

Determinación de la relación entre calado y caudal en flujos hiperconcentrados



Raúl López Alonso
Profesor de Ingeniería Hidráulica
Departamento de Ingeniería
Agroforestal
Universidad de Lleida

En torrentes y ríos de cuencas de montaña como respuesta a tormentas de carácter torrencial se generan flujos que pueden transportar grandes concentraciones de material sólido si existe suficiente sedimento disponible. Cuando la concentración de sedimentos que carga la corriente supera ciertos límites se modifica la mecánica del flujo, de tal manera que el caudal sólido condiciona el cálculo hidráulico. En ese caso, la aplicación de ecuaciones de resistencia al flujo o de transporte de sedimentos desarrolladas para corrientes de baja concentración de sedimentos daría lugar a resultados muy alejados de la realidad. Consiguientemente, es preciso contar con métodos de cálculo apropiados a la hora de abordar la resolución de problemas en los que intervengan flujos con gran carga sólida. En este artículo se muestran sucintamente las diferentes categorías de flujo que ocurren en cauces de montaña y los criterios para la identificación de los mismos y se presentan tres métodos para la resolución del flujo hiperconcentrado.

En torrentes y ríos de cuencas de montaña, debido especialmente a la fuerte pendiente, la capacidad de transporte de sedimentos con la que cuenta el flujo originado por tormentas torrenciales de alta intensidad es muy elevada. Si existen sedimentos disponibles para la corriente, ésta presentará una importante carga de sólidos, desde arcillas hasta bolos. Conocida por sus efectos dramáticos es la avenida catastrófica de agosto de 1996 en la cuenca del barranco de Arás (Biescas, Huesca), donde en unas pocas horas se calcula que un mínimo de 100 mil toneladas de sedimento con origen en la cuenca de recepción y en la garganta del torrente se depositaron en el cono de deyección (p. ej. White et al., 1997; Alcoverro et al., 1999 y Batalla et al., 1999).

Cuando la concentración de sedimentos supera cierto umbral, el caudal sólido transportado modifica el comportamiento del flujo, de tal manera que cambia la relación entre la profundidad de la corriente y el caudal líquido, impidiendo un cálculo independiente del caudal líquido y sólido. En ese caso, si, obviando lo anterior, se aplicarán ecuaciones de resistencia al flujo y de transporte sólido desarrolladas para ríos en tramos de llanura, o incluso derivada para ríos de montaña pero con flujos de baja concentración sólida, se obtendrían resultados erróneos.

En consecuencia, se hace necesario contar con métodos que permitan un cálculo integrado de la profundidad de la corriente, del caudal líquido y del sólido, incorporando el efecto de la carga sólida sobre la mecánica del flujo. En este sentido, los objetivos de es-

te artículo son: mostrar los diferentes tipos de flujo que tienen lugar en cauces de montaña y los criterios para su identificación, así como la exposición de una selección de tres métodos para la resolución del flujo hiperconcentrado, presentado también un ejemplo de cálculo donde se contrastan los resultados con métodos desarrollados para flujos de baja concentración.

CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE FLUJOS EN CAUCES DE MONTAÑA

2.1.- Categorías de flujos

De forma esquemática pueden establecerse tres categorías de flujo en cauces de montaña: flujo de baja concentración, flujo hiperconcentrado y lava torrencial. En los siguientes párrafos se exponen las características fundamentales de cada uno.

a.- Flujo de baja concentración

Un flujo de agua, que aquí denominaremos de baja concentración, es un flujo turbulento y newtoniano (la relación entre la tensión de corte en el fluido y el gradiente de velocidad es lineal) que transporta relativamente pequeñas cantidades de sedimento. Este tipo de

flujo también suele denominarse bifásico porque puede asumirse que el transporte sólido no condiciona hidráulicamente al flujo líquido; por consiguiente, se considera aceptable el cálculo separado de caudal líquido y sólido. Por ejemplo, puede emplearse el caudal líquido para el cálculo del área mojada, la velocidad media o la tensión tractiva y posteriormente utilizar el valor obtenido en el cálculo del caudal sólido. Según Costa (1984), en esta categoría de corrientes la concentración volumétrica de sedimentos, C_v , expresada como caudal sólido sobre caudal total (líquido más sólido, ambos en volumen) es inferior al 20% (25% si se refiere a concentración de caudal sólido sobre caudal líquido, C) y la densidad es inferior a $1,3 \text{ g/cm}^3$. No obstante, los umbrales entre las categorías de flujo propuestos por otros autores pueden diferir sustancialmente, por lo que aquí se presentan a título orientativo.

b.- Flujo hiperconcentrado

Un flujo hiperconcentrado transporta una gran cantidad de sedimento, en suspensión o de fondo, aunque todavía es aceptable asumir que puede darse como flujo permanente y uniforme. Sin

embargo, la concentración de sedimentos modifica las características del flujo, de tal modo que no es factible ignorar la fase sólida en el cálculo de la fase líquida. El espesor de la capa móvil del transporte de fondo de sedimentos gruesos puede llegar a un 5% de la profundidad del flujo. Si nos centramos en un aspecto del flujo, el calado, éste será superior en un flujo hiperconcentrado que en un flujo sin transporte de sedimentos para el mismo caudal líquido, a igualdad del resto de condiciones. Por lo tanto, cabe distinguir entre el calado real o registrado de un flujo hiperconcentrado, y_m , y un calado ficticio correspondiente al mismo caudal líquido, y_l . Del mismo modo puede concebirse una velocidad real de la mezcla y una velocidad ficticia debida únicamente al caudal líquido, v_l . De acuerdo con Costa (1984), en un flujo hiperconcentrado C_v variaría entre 20-50% (C entre 25-100%) y alcanzaría densidades comprendidas entre $1,3$ y $1,8 \text{ g/cm}^3$. Sin embargo, Meunier (1991) propone un límite mínimo para esta categoría de flujo del orden del 5% para C , además de considerar un umbral para pendientes longitudinales del cauce mayor del 7-10%. A fin de aplicar los métodos de

Laderas con abundante material no consolidado y vegetación inadecuada o insuficiente son fuente de sedimento



cálculo que se presentan en este artículo, se propone tomar el criterio de éste último autor, dado que dichos métodos también son aplicables para bajas concentraciones y así se evita el riesgo de no tratar un flujo hiperconcentrado como tal.

c.- Lava torrencial

Por último, una lava torrencial es un flujo mezcla de agua y sedimento, grueso y fino, de carácter visco-plástico (no newtoniano) que presenta altas concentraciones de material sólido. Las partículas más finas de arcilla generan una matriz de soporte que ofrece continuidad en todo el calado al elemento sólido, de tal modo que las partículas gruesas se encuentran presentes a cualquier profundidad. El flujo presenta un carácter pulsátil, intrínsecamente no permanente o transitorio, por lo no es lícito concebirlo como flujo uniforme. Para Costa (1984), en la lava torrencial el valor de C_v supera el 50% (100% expresada en C) y la densidad sobrepasa $1,8 \text{ g/cm}^3$, mientras que Meunier (1991) considera que C_v varía entre el 40-70% (67-230% según C). Meunier (1991) denomina al primer tipo de flujo como fluvial y las otras dos categorías como flujos torrenciales, porque en ambos no es posible tratar independientemente fase sólida y líquida a efectos de cálculo.

Se debe tener presente que en una misma avenida pueden darse los tres tipos de flujo anteriormente expuestos, variando hacia aguas abajo o con el tiempo. En cualquier caso la relación entre caudal líquido y sólido en torrentes o ríos de montaña es sumamente compleja, motivada por la variabilidad espacial y temporal de la disponibilidad de sedimentos. Por ejemplo, debido al fenómeno de acorazamiento, que supone la existencia de una coraza de elementos más gruesos en la superficie de lecho frente a las partículas más finas del substrato. Para flujos previos a la destrucción de la coraza es posible que en el transporte de sedimentos predomine la fracción más fina o el agua clara si no hay sedimento disponible. No obstante, si se destruye la coraza, por ejemplo por una avenida de gran periodo de retorno, y no se restituye de forma inmediata, los flujos del mismo orden incrementarían notablemente el acarreo dada la disponibilidad de sedimento más fino del substrato.



Depósito de flujo hiperconcentrado en el torrente de Arás (subcuenca de Betés) durante el episodio torrencial de agosto de 1996

Asimismo, la ausencia de llanuras de inundación en torrentes o ríos de fuerte pendiente conlleva una gran influencia de los procesos geomórficos de vertiente, de tal modo que fenómenos gravitacionales como caídas y deslizamientos incrementan directamente el sedimento disponible para el transporte a través del cauce.

2.2.- Identificación con base a los depósitos de sedimento

Cuando se analiza una avenida ocurrida es necesario identificar el tipo de flujo entre los arriba expuestos, ya que las ecuaciones que rigen en cada uno son diferentes. A tal fin puede ser útil reconocer los principales rasgos de las estructuras sedimentarias. Según Wohl (2000), las diferencias más significativas se producen entre el flujo de baja concentración y el hiperconcentrado, por un lado, y la lava torrencial por el otro. En las dos primeras categorías los clastos o detritos se orientan con el eje mayor en la dirección del flujo, se hallan bermas de cumbre plana y los depósitos están mejor clasificados y presentan texturas sustentadas por clastos con cierta estratificación y gradación. En el caso de la lava torrencial los clastos de mayor tamaño depositados no muestran una orientación preferente, los depósitos se presentan en forma de múltiples lóbulos de flancos pronunciados y, también, en forma de diques o albardones (*levees*) de cresta escarpada. Además, en los depósitos las partículas más gruesas se encuen-

tran distribuidas en una matriz de material fino con mínima clasificación y estratificación del sedimento. La deposición de las lavas torrenciales se produce por disminución de la pendiente o por pérdida de confinamiento de flujo o por una combinación de ambas. Según VanDine (1996), la lava torrencial se genera en tramos de cauce con pendiente superior al 47%, el transporte y la erosión tiene lugar para pendientes superiores a 27%, por debajo de este último valor se produce la deposición parcial en forma de diques y la deposición en conos de deyección comienza por debajo del 18%. Si se desea profundizar en la identificación del tipo de flujo con base en los depósitos, entre otras obras, puede consultarse Costa (1988).

MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DEL FLUJO HIPERCONCENTRADO

La resolución práctica del flujo hiperconcentrado supone la determinación de la relación existente entre el calado del flujo (de forma más general, la sección transversal del flujo), el caudal líquido y el caudal sólido transportado; teniendo en cuenta que este último condiciona la relación de los primeros. En aras de la brevedad, en este artículo los métodos se presentan suponiendo conocido el nivel del flujo y como incógnitas el caudal líquido y sólido, como sería el caso del análisis de una crecida. Sin embargo, dichos métodos pueden emplearse en el otro sentido, es decir, conocido el caudal líquido es posible determinar el caudal sólido y la

profundidad media de la mezcla de agua y sedimentos. Es importante remarcar que las metodologías expuestas bajo este epígrafe no son directamente aplicables a flujos de lava torrencial, de ahí la trascendencia de identificar el tipo de flujo.

Los tres métodos que se presentan son de naturaleza teórico-empírica con base en experiencias, que abarcan un dilatado periodo, en canales del Laboratorio de Hidráulica del EHT de Zurich. Las condiciones bajo las que fueron realizados los ensayos implican una serie de limitaciones a la hora de aplicar los métodos. En cada caso concreto deberá valorarse el grado de cumplimiento de las mismas en función de los datos disponibles. Las hipótesis fundamentales son las siguientes:

1.- El régimen del flujo es uniforme, es decir, el tramo de cauce analizado debe tender a ser prismático y de pendiente longitudinal constante. Conviene precisar que debido a la geomorfología propia de ríos de montaña o torrentes esta propiedad se concibe en promedio a lo largo de un tramo.

2.- La capacidad del flujo para el transporte de sedimentos de fondo no se encuentra limitada por la disponibilidad de sedimento.

3.- El transporte sólido de fondo cumple con la condición de equilibrio, de tal modo que mientras ocurre el transporte no se produce ni ascenso ni descenso del fondo; consiguientemente, el lecho se mantiene a la misma cota.

A continuación se exponen los tres métodos seleccionados, indicando el conjunto de ecuaciones desarrolladas, así como las principales características de los ensayos en los que se basan, de lo que es posible deducir las recomendaciones de aplicación de cada uno. Previamente, conviene señalar que en Martín-Vide (2002) se propone un método alternativo, no expuesto en este artículo, para el cálculo de la influencia del transporte sólido en la profundidad del flujo. Dicho método se basa en una modificación de la ecuación de cantidad de movimiento para un flujo con sedimentos en suspensión y carga de fondo propuesta por García-Nájera (1962).

3.1.- Smart y Jaeggi (1983)

Smart y Jaeggi (1983) ensayaron en un canal de laboratorio en un rango de pendientes longitudinales comprendido entre el 3 y el 20%, empleando

una mezcla de grava y arena como material del lecho. Se registraron flujos en régimen uniforme con transporte sólido que llegaron a alcanzar concentraciones (C_v) de hasta el 24%. En cuanto a las formas de fondo se detectó lecho plano móvil y antidunas. A partir de los datos obtenidos en los ensayos referidos y de los datos de Meyer-Peter y Müller (1948), como representativos estos últimos de condiciones de transporte de fondo de baja concentración y

para pendientes entre el 0,04 y el 2%, Smart y Jaeggi (1983) propusieron una metodología para obtener el caudal líquido y sólido a partir de la sección mojada por el flujo de mezcla agua y sedimentos. El método se restringe a sedimentos mayores de 0,4 mm, pendientes del cauce entre 0,04 y 20% y d_{90}/d_{30} e inferior a 8,5. En la **figura 1** se muestra el diagrama de cálculo para este método, hallándose la notación en el Apéndice I.

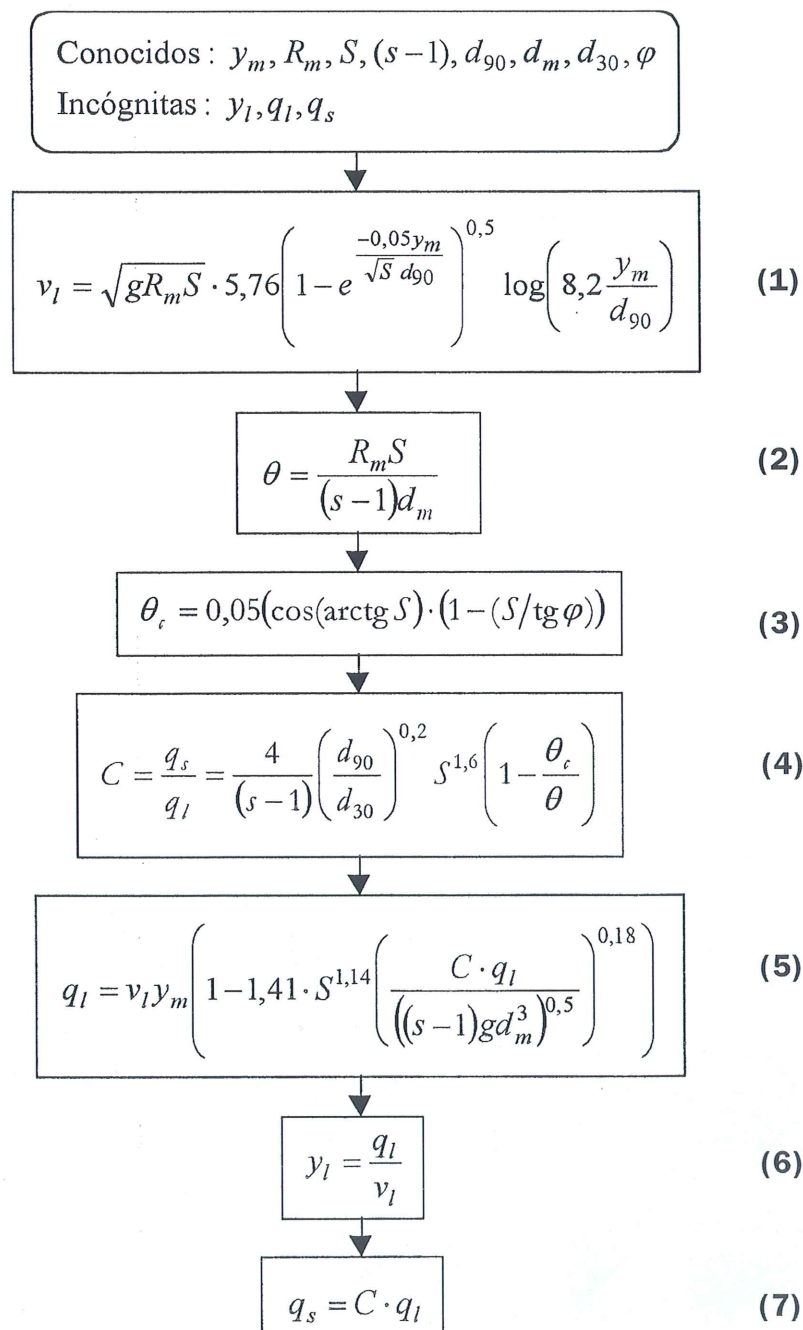


Figura 1.- Diagrama de cálculo del método de Smart y Jaeggi (1983).

3.2.- Meunier (1989)

Con el fin de proponer una alternativa que requiriera menor información, básicamente de las propiedades de los sedimentos, Meunier (1989), a partir de la regresión de 71 de los datos obtenidos por Smart y Jaeggi (1983), propone ecuaciones simplificadas para el cálculo de la velocidad del fluido, la concentración de caudal sólido sobre caudal líquido y del calado ficticio de flujo líquido. Al no incluir los datos de Meyer-Peter y Müller, este método se recomienda únicamente para pendientes entre el 3 y el 20%. En la **figura 2** se muestra el diagrama de cálculo para este método, hallándose la notación en el Apéndice I.

3.3.- Rickenmann (1990)

Rickenmann (1990) obtuvo 50 datos en un canal de laboratorio con pendientes entre el 5 y 20%, en condiciones de transporte sólido de fondo de gravas y suspensión de arcilla, variando ésta última desde agua clara hasta una densidad de 1,4 g/cm³. La metodología que se presenta incluye también los derivados de las experiencias de Smart y Jaeggi (1983) y Meyer-Peter y Müller (1948). Se recomienda su aplicación en el rango de pendientes arriba indicado y para d_{90}/d_{30} inferior a 10. Si se deseara emplear para pendientes entre el 0,2 y el 5%, la ecuación (14) debería sustituirse por la ecuación (1). En la **figura 3** se muestra el diagrama de cálculo para este método, hallándose la notación en el Apéndice I.

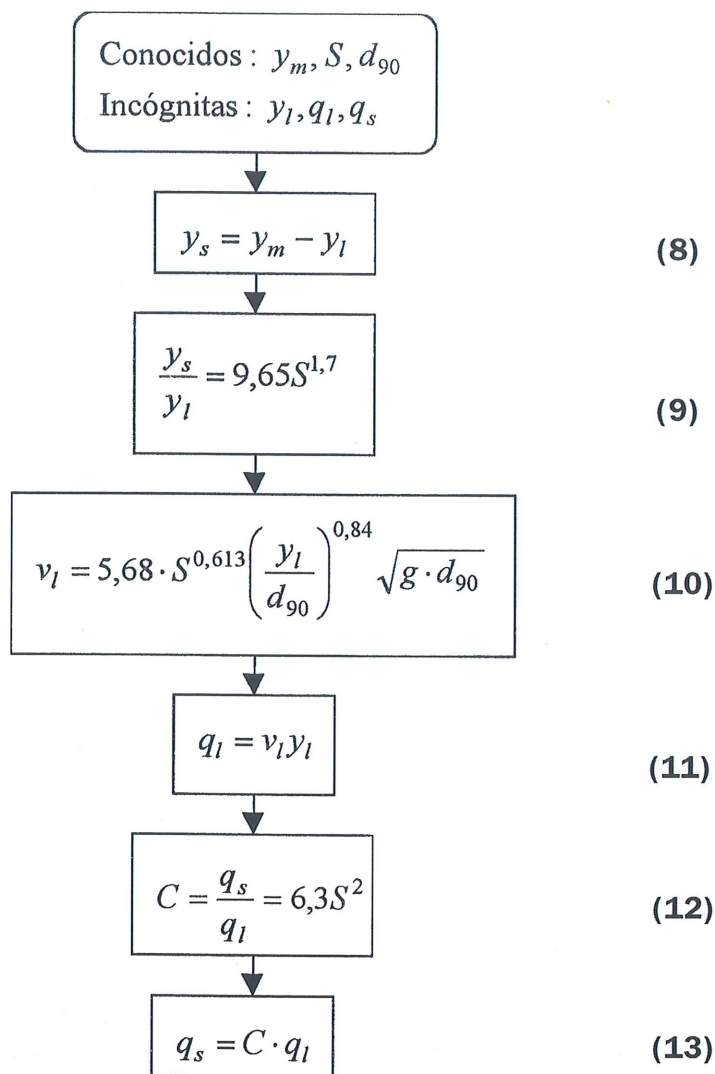


Figura 2.- Diagrama de cálculo del método de Meunier (1989).



Conocidos : $y_m, R_m, S, (s-1), d_{90}, d_m, d_{30}$

Incógnitas : y_l, q_l, q_s

$$v_l = \sqrt{g R_m S} \cdot 1,5 \left(\frac{y_m}{d_{90}} \right)^{0,5} \frac{1}{S^{0,29}} \quad (14)$$

$$C = \frac{q_s}{q_l} = \frac{17,3}{(s-1)^{2,0}} \left(\frac{d_{90}}{d_{30}} \right)^{0,2} S^{2,1} \quad (15)$$

$$\frac{y_l}{y_m} = 1 - 1,64 S^{0,42} \left(\frac{q_s}{q_l} \right)^{0,63} \quad (16)$$

$$q_l = v_l \cdot y_l \quad (17)$$

$$q_s = C \cdot q_l \quad (18)$$

Figura 3.- Diagrama de cálculo del método de Rickenmann (1990).

3.4.- Ejemplo de cálculo

Supóngase que en un tramo de torrente de montaña se ha producido una avenida de la que solamente se conocen las trazas de nivel máximo. A partir de dichas marcas se ha podido determinar que la sección transversal ocupada por la crecida se caracteriza por un ancho medio de 20 m y un radio hidráulico de 1,5 m. Se asumirá que el radio hidráulico representa el calado medio de la mezcla de agua y sedimentos y, además, que el lecho ocupado por la avenida es activo respecto al transporte de acarreo. La pendiente media longitudinal del tramo es del 12%, y del material del lecho se conoce que d_{30} , d_{90} y d_m son respectivamente 100, 400 y 250 mm. Se tomará un ángulo de reposo de los sedimentos sumergidos de 35°. Se supondrá que la densidad relativa de los sedimentos respecto al fluido, s , tiene un valor de 2,65. Con esta variable puede tenerse en cuenta el aumento de la densidad del fluido debida al transporte en suspensión.

Se desea conocer el caudal líquido

ciando los efectos del transporte sólido sobre la geometría de la sección mojada y asumiendo que el flujo no es hiperconcentrado. Como representantes de estos últimos se aplicarán dos ecuaciones de resistencia al flujo. La primera ecuación es la propuesta por Meyer-Peter y Müller (1948), expresada en función del factor de fricción de Darcy-Weisbach:

$$v_l = \sqrt{g R_m S} \cdot 8,30 \left(\frac{R_m}{d_{90}} \right)^{1/6} \quad (19)$$

y calculando el caudal líquido como:

$$Q_l = v_l y_m b \quad (20)$$

La segunda ecuación es la de Ho y Huang (1992), también expresada en función de factor de fricción de Darcy-Weisbach:

$$v_l = \sqrt{g R_m S} \cdot 5,11 \left(\frac{R_m}{d_{90}} \right)^{1/6} \quad (21)$$

calculándose el caudal líquido mediante la ecuación (20).

El resultado de los cálculos se resume en la **tabla 1**. Al aplicar los tres primeros métodos se obtiene un valor promedio del caudal líquido de 184,2 m³/s, con un coeficiente de variación del 2,6%; por otra parte, el promedio de caudal sólido resulta ser de 17,6 m³/s, con un coeficiente de variación del 5,7%. La concentración de sedi-

y el caudal sólido correspondientes al nivel máximo, asumiendo régimen uniforme. Además, se contrastarán los métodos presentados con aquellos que calculan el caudal líquido independientemente del caudal sólido, despre-

MÉTODO DE CÁLCULO

Variable	Smart y Jaeggi	Meunier	Rickenmann	Meyer-Peter y Müller	Ho y Huang
v_l (m/s)	7,36	7,65	7,14	13,74	8,46
θ	$4,36 \cdot 10^{-1}$	—	—	—	—
θ_c	$4,11 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	—
C	$9,74 \cdot 10^{-2}$	$9,07 \cdot 10^{-2}$	$9,77 \cdot 10^{-2}$	—	—
q_l (m³/s·m)	9,49	9,09	9,04	20,6	12,7
y_l (m)	1,29	1,19	1,27	1,5	1,5
q_s (m³/s·m)	$9,24 \cdot 10^{-1}$	$8,25 \cdot 10^{-1}$	$8,83 \cdot 10^{-1}$	—	—
y_m/y_l	1,16	1,26	1,18	1,0	1,0
Q_l (m³/s)	189,8	181,9	180,9	412,4	253,9
Q_s (m³/s)	18,5	16,5	17,7	—	—

Tabla 1. Resumen de los resultados del ejemplo de cálculo.

mentos pronosticada (expresada como C) es en cualquier caso superior al 9%, por lo que según el criterio de Meunier (1991) se trataría de un flujo hiperconcentrado.

El caudal líquido obtenido empleando la ecuación (19) es un 124% superior al valor medio de los métodos que asumen flujo hiperconcentrado. Esto se explica porque dicha fórmula desprecia el efecto de la concentración de sedimentos en el flujo, pero además porque no se recomienda aplicarla para cauces con pendientes superiores al 2,3%. Sin embargo, la ecuación (21) se desarrolló con datos de cauces de hasta el 10% de pendiente, valor mucho más próximo al del ejemplo. Por consiguiente, lo anterior explicaría el hecho de que el caudal líquido pronosticado por la ecuación (21) sea sólo un 38% superior al promedio de los tres primeros métodos, aunque si la concentración de sedimentos fuera mucho mayor la desviación se incrementaría. En definitiva, las ecuaciones (19) y (21) sobrestiman el caudal líquido y, consecuentemente, sobrevaloran el periodo de retorno del caudal máximo de avenida, lo que puede inducir a tomar decisiones inadecuadas en el ámbito de la gestión de riesgos naturales. **F**

APÉNDICE I

Notación

A_m	Área de la sección mojada por la mezcla de agua y sedimentos	(m ²)
b	Ancho medio de la sección	(m)
C	Concentración de caudal (en volumen) sólido sobre el caudal (en volumen) líquido	(-)
C_v	Concentración de caudal (en volumen) sólido sobre el caudal (en volumen) total (líquido más sólido)	(-)
d_i	Diámetro de la partícula para el que el i % de la muestra es inferior	(m)
d_m	Diámetro medio aritmético de la muestra de sedimento	(m)
g	Aceleración de la gravedad	(m/s ²)
q_l	Caudal líquido por unidad de ancho	(m ³ /(s·m))
q_s	Caudal sólido por unidad de ancho	(m ³ /(s·m))
Q_l	Caudal líquido	(m ³ /s)
Q_s	Caudal sólido	(m ³ /s)
R_m	Radio hidráulico de la sección ocupada por la mezcla de agua y sedimentos	(m)
S	Pendiente longitudinal del lecho	(-)
s	Densidad relativa de los sedimentos respecto al fluido	(-)
T_m	Ancho de la superficie libre de la mezcla de agua y sedimentos	(m)
v_l	Velocidad ficticia media del líquido	(m/s)
y_l	Calado ficticio medio del líquido	(m)
y_m	Calado medio de la mezcla de agua y sedimento: $y_m = A_m/T_m$	(m)
y_s	Calado ficticio medio del caudal sólido	(m)
ϕ	Ángulo de reposo de los sedimentos sumergidos	(°)
θ	Tensión de corte adimensional	(-)
θ_c	Tensión de corte crítica adimensional	(-)

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento al profesor Ramon J. Batalla de la Universidad de Lleida por los comentarios que han mejorado el trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- ALCOVERRO, J., COROMINAS, J. y GÓMEZ, M. (1999). "The Barranco de Arás flood of 7 August, 1996 (Biescas, Central Pyrenees, Spain)". *Engineering Geology*. 51, pp. 237-255.
- BATALLA, R.J., DE JONG, C., ERGENZINGER, P. y SALA, M. (1999). "Field observations on hyperconcentrated flows in mountain torrents". *Earth Surface Processes and Landforms*. 24, pp. 247-253.
- COSTA, J.E. (1984). "Physical geomorphology of debris flow". *COSTA, J.E. y FLEISHER, P.J. (Eds.) Development and application of geomorphology*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 268-317.
- COSTA, J. E. (1988). "Rheologic, geomorphic and sedimentological differentiation of water floods, hyperconcentrated flows and debris flows". *BAKER, V. R., KOCHER, C. y PATTON, P. C. (Eds.) Flood Geomorphology*. Wiley-Interscience, New York, pp. 113-122.
- GARCÍA-NÁJERA, J.M. (1962). *Principios de hidráulica torrencial y sus aplicaciones a la corrección de torrentes*. IFIE, Madrid. 297 pp.
- HO, C.W. y HUANG, H.P. (1992). "Manning's roughness coefficient of mountain streams in Taiwan". *YEN, B.C. (Ed.) Channel flow resistance: Centennial of Manning's formula*. Water Resources Publications. Littleton, USA, pp. 299-308.
- MARTÍN-VIDE, J. (2002). *Ingeniería de ríos*. Edicions Universitat Politècnica de Catalunya. 331 pp.
- MEUNIER, M. (1989). "Essai de synthèse des connaissances en érosion et hydraulique torrentielle". *La Houille Blanche*. 5, pp. 361-375.
- MEUNIER, M. (1991). *Elements d'hydraulique torrentielle*. Etudes du CEMAGREF, série Montagne n° 1. Grenoble. 278 pp.
- MEYER-PETER, E. y MÜLLER, R. (1948). "Formulas for bed-load transport". *Proc. of the second meeting of the IAHSR*. Estocolmo, pp. 39-64.
- MINGUE, J.A. y ROBREDO, J.C. (2000). "Panorama actual de la hidráulica torrencial. Síntesis del estado de la cuestión". Seminario de análisis de cursos torrenciales. Compensación de pendientes y estabilización de cauces. Universidad Politécnica de Madrid.
- RICKENMANN, D. (1990). *Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes*. Diss., 9065. ETH Zürich. 249 pp.
- RICKENMANN, D. (1991). "Hyperconcentrated Flow and Sediment Transport at Steep Slopes". *Journal of Hydraulic Engineering*. 117, 11, pp. 1419-1439.
- SMART, G.M. y JAEGGI, M. (1983). "Sediment transport on steep slopes". *Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, 64, ETH Zürich. 101 pp.
- SMART, G.M. (1984). "Sediment transport formula for steep channels". *Journal of Hydraulic Engineering*. 110, 3, pp. 267-276.
- VANDINE, D.F. (1996). *Debris flow control structures for forest engineering*. Ministry of Forest. British Columbia. Victoria. 68 pp.
- WHITE, S., GARCÍA-RUIZ, J., MARTÍ, C., VALERO, B., ERREA, M.P. y GÓMEZ-VILLAR, A. (1997). "The 1996 Biescas campsite disaster in the central Spanish Pyrenees, and its temporal and spatial context". *Hydrological Processes*. 11, pp. 1797-1812.
- WOHL, E. (2000). *Mountain Rivers*. Water Resources Monograph. 14. American Geophysical Union. 320 pp.